

EXTRAÇÃO DE MÁSCARAS DO INFRAVERMELHO PRÓXIMO PARA DETECÇÃO DE CHEIAS NAS SUPERFÍCIES DA PLANÍCIE DE INUNDAÇÃO DO ALTO RIO PARANÁ.

Alisson Rodrigues Santori¹

José Cândido Stevaux²

Isabel Terezinha Leli³

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a eficácia da banda do infravermelho próximo (NIR) dos sensores Landsat na identificação de áreas alagadas ou inundadas durante eventos de cheia na planície de inundação do alto rio Paraná. A metodologia consistiu na aplicação de limiares espectrais derivados de imagens do satélite Landsat-5 para gerar máscaras binárias que delimitem áreas com presença de água superficial. A análise foi realizada em diferentes datas com registros hidrológicos associados às cheias, e os resultados foram integrados a dados de cota fluviométrica e vazão para avaliar a resposta espacial do índice. O estudo demonstrou que a técnica é sensível à variação hidrológica e útil para o monitoramento de cheias em planícies extensas e de difícil acesso. Além disso, a integração com SIG possibilitou a caracterização espacial das inundações e a compreensão da conectividade hidrológica lateral da planície.

Palavras-Chaves: Sensoriamento Remoto; Inundação; Hidrologia; SIG

EXTRACTION OF NEAR-INFRARED MASKS FOR FLOOD DETECTION ON THE FLOODPLAIN SURFACES OF THE UPPER PARANÁ RIVER.

¹Doutor em Geografia; Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS, Três Lagoas-MS, Brasil; Email: rodriguessantori@hotmail.com

²Doutor em Geociências; Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS, Três Lagoas-MS, Brasil; Email: josecstevaux@gmail.com

³Doutora em Geociências; Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS, Três Lagoas-MS, Brasil; Email: isabeltleli@gmail.com

ABSTRACT

The aim of this study is to evaluate the effectiveness of the near-infrared (NIR) band from Landsat sensors in identifying flooded or inundated areas during flood events in the floodplain of the upper Paraná River. The methodology consisted of applying spectral thresholds derived from Landsat-5 satellite images to generate binary masks that delineate areas with the presence of surface water. The analysis was conducted on different dates associated with hydrological records of floods, and the results were integrated with river stage and discharge data to assess the spatial response of the index. The study demonstrated that the technique is sensitive to hydrological variation and useful for monitoring floods in extensive and hard-to-access floodplains. Furthermore, the integration with GIS enabled the spatial characterization of floods and the understanding of the lateral hydrological connectivity of the floodplain.

Keywords: Remote Sensing; Flooding; Hydrology; GIS

EXTRACCIÓN DE MÁSCARAS DEL INFRARROJO CERCANO PARA LA DETECCIÓN DE INUNDACIONES EN LAS SUPERFICIES DE LA LLANURA DE INUNDACIÓN DEL ALTO RÍO PARANÁ.

RESUMEN

El objetivo de este estudio es evaluar la eficacia de la banda del infrarrojo cercano (NIR) de los sensores Landsat en la identificación de áreas anegadas o inundadas durante eventos de crecida en la llanura de inundación del alto río Paraná. La metodología consistió en la aplicación de umbrales espectrales derivados de imágenes del satélite Landsat-5 para generar máscaras binarias que delimiten las áreas con presencia de agua superficial. El análisis se realizó en diferentes fechas con registros hidrológicos asociados a crecidas, y los resultados se integraron con datos de nivel fluviométrico y caudal para evaluar la respuesta espacial del índice. El estudio demostró que la técnica es sensible a la variación hidrológica y útil para el monitoreo de crecidas en llanuras extensas y de difícil acceso. Además, la integración con SIG permitió la

caracterización espacial de las inundaciones y la comprensión de la conectividad hidrológica lateral de la planicie.

Palabras-Clave: Teledetección; Inundación; Hidrología; SIG

INTRODUÇÃO

A planície de inundação do alto rio Paraná, um dos maiores rios da América do Sul, consiste em um ambiente complexo e dinâmico, em que sua estrutura e funcionamento está muito associada às características antigas e atuais do canal principal. O sistema do alto rio Paraná apresenta uma complexa rede de canais, lagoas, banhados e áreas sazonalmente alagadas, que resultam da dinâmica natural do regime hidrológico do rio Paraná. Essa região desempenha um papel crucial na regulação do ciclo hidrológico, no armazenamento de água e na manutenção da biodiversidade (LELI; STEVAUX, 2022). A detecção e o monitoramento de áreas inundadas são essenciais para a gestão eficaz de recursos hídricos e para a mitigação de desastres naturais em regiões propensas a cheias, como a planície de inundação do alto rio Paraná. Nessa perspectiva, o sensoriamento remoto tem se destacado como uma ferramenta valiosa, que permite a análise de grandes extensões territoriais com eficiência e precisão (ALLEN, 2016). Em particular, a utilização da banda do infravermelho próximo (NIR) em imagens de satélite tem se mostrado eficaz na identificação de corpos hídricos, uma vez que a água absorve fortemente a radiação nessa faixa espectral, resultando em baixos valores de refletância, possibilitando a extração de índices e máscaras que realçam áreas com presença de água, diferenciando-as de solos secos.

A integração de dados de sensoriamento remoto com Sistemas de Informação Geográfica (SIG) permite a análise espacial detalhada, facilitando a identificação de áreas suscetíveis a inundações (TOWNSEND; WALSH, 1998). A aplicação de técnicas de extração de máscaras a partir da banda NIR, combinada a algoritmos de classificação e segmentação, permite delimitar precisamente áreas alagadas, mesmo em regiões de difícil acesso. Assim, tais tecnologias contribuem significativamente no entendimento da dinâmica hidrológica da planície de inundação do alto rio Paraná. Através da aquisição sistemática de dados multiespectrais por sensores orbitais possibilita observar as variações na superfície terrestre ao

longo do tempo, e identificar as alterações na dinâmica hidrológica de grandes rios (BATES et al., 1997).

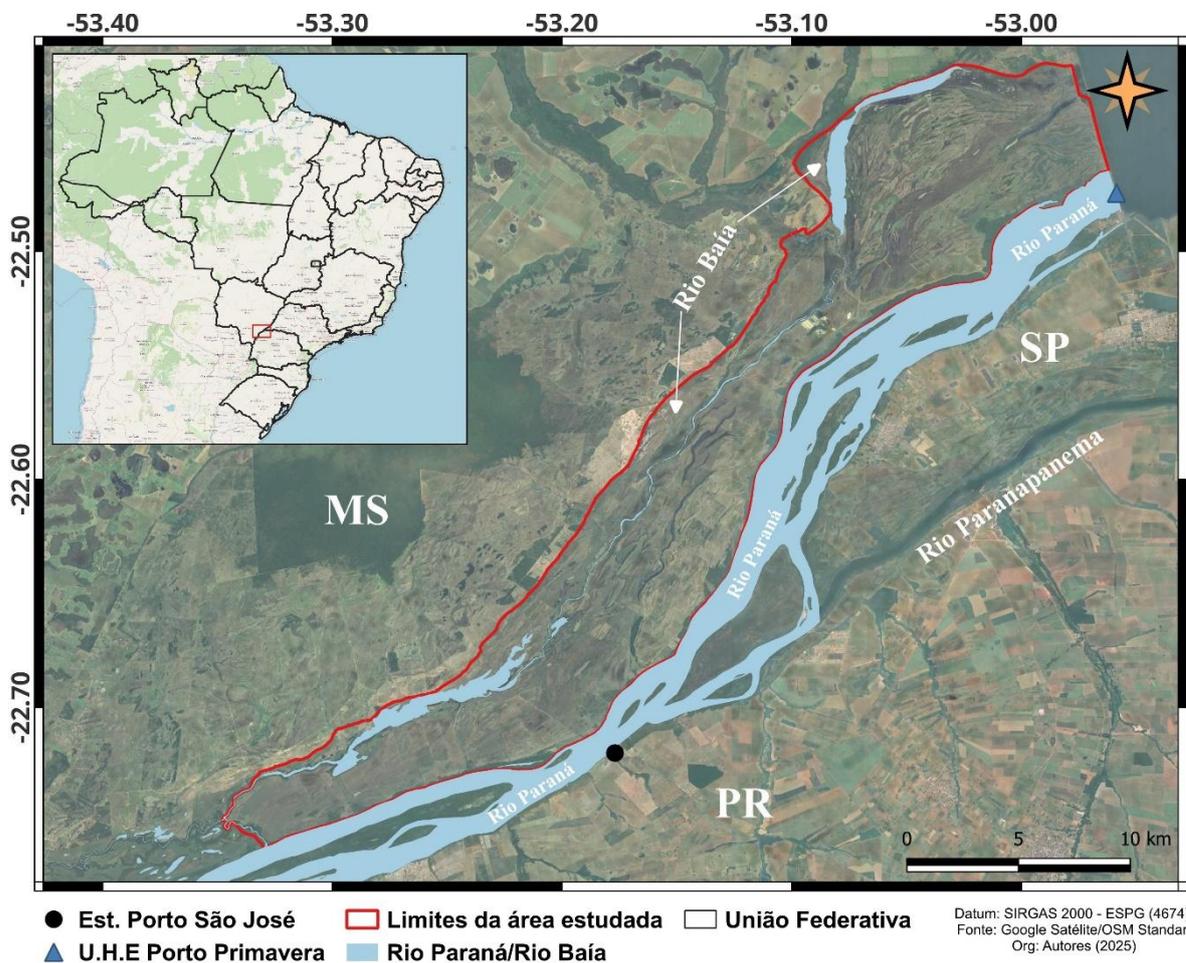
As interferências antrópicas no regime natural do rio Paraná são antigas, amplas e recorrentes. Elas têm causado profundas alterações em sua dinâmica hidrológica, especialmente devido à construção de barragens ao longo do seu curso (STEVAUX; MARTINS; MEURER, 2009). Dentre elas, destaca-se a Usina Hidrelétrica de Porto Primavera, localizada no trecho superior do rio, entre os estados de São Paulo e Mato Grosso do Sul. Inaugurada em 1999, essa barragem alteraram significativamente uma série de variáveis dependentes provocando, por exemplo, redução da carga suspensa, aumento da textura do sedimento de fundo, alteração das formas de leito, e mudança na variedade e quantidade do estoque pesqueiro (STEVAUX et al. 2009). Entre as variáveis modificadas destaca-se o pulso de inundação natural, que antes ocorria de forma sazonal, regulando os ciclos ecológicos da planície de inundação (MEURER, 2004; MEURER; MARTINS; SOUZA-FILHO, 2005). O represamento da água reduziu a frequência e a intensidade das cheias, impactando diretamente a biodiversidade aquática e terrestre da região, além de modificar a morfologia fluvial e a conectividade hidrológica (ROCHA, 2002; STEVAUX; CORRADINI; AQUINO, 2009),

Dentre os estudos já realizados com objetivo de detectar e extrair dados espaciais de imagens de satélite, a aplicação de máscaras com foco especial em determinados elementos ambientais, mostrou-se uma técnica muito adequada para isolar áreas de interesse com base em valores específicos das bandas espectrais (OVERTON, 2005; SILVA; LIPORACE, 2016; ALBERTINI et al., 2022). Sendo assim, este trabalho tem como objetivo verificar, por meio do emprego de SIG: 1) a variação das manchas de saturação/encharcamento e inundação na superfície da planície de inundação, ressaltando como esta dinâmica ocorre de forma gradual em diferentes altimetrias; 2) a dinâmica de conectividade e extensão das cheias e sua relação com a morfologia da planície de inundação do Alto Rio Paraná.

METODOLOGIA

A área estudada está localizada no sudeste do estado de Mato Grosso do Sul (Lat. 22° 25' 36'' S / Long. 52° 97' 79'' O e lat. 22° 25' 36'' S/ long. 53° 34' 55'' O), logo ao sopé da U. H. E Eng. Sérgio Motta (Porto Primavera). O local corresponde a um trecho de 308 km² da planície de inundação do rio Paraná disposta na margem direita do canal. Trata-se de um ambiente fluvial dinâmico, fortemente influenciado pelo regime hidrossedimentológico regulado pela barragem. A paisagem é marcada pela presença de canais ativos (rio Baía) e abandonados, bancos de areia, ilhas fluviais e lagos marginais.

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A metodologia é sintetizada em três etapas: 1) Levantamento bibliográfico e de dados; 2) Análise do regime hidrológico; 3) Extração e tratamento de informações geoespaciais. Inicialmente, para se obter uma base teórico-metodológica foi feito um levantamento bibliográfico com trabalhos nacionais e internacionais sobre as características do regime fluvial do rio Paraná, das condições gerais da morfologia de planície de inundação do alto Paraná e das técnicas de análise e extração de informações digitais em produtos de sensoriamento remoto.

O levantamento de dados foi realizado através de consultas a plataformas digitais geridas por órgãos governamentais. Os dados hidrológicos foram coletados dados hidrológicos do rio Paraná foram coletados entre 2013 e 2019 na estação fluviométrica de Porto São José (PSJ), localizada na cidade de Porto Rico, Paraná. Os dados que contemplam séries históricas com medições de cota (nível d'água) e vazão (volume de água escoando por segundo), disponíveis no banco de dados HIDROWEB, são fundamentais para o monitoramento hidrológico da bacia. Esses dados são adquiridos por meio de sensores automáticos e medições in situ realizadas por órgãos como a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA)

Os dados de sensoriamento remoto foram adquiridos por meio do portal *EarthExplorer* administrado pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (United States Geological Service - USGS), abrangendo os anos de 2005, 2007, 2010, 2011 e 2016, que registraram cheias ou inundações significativas. A seleção foi feita pelos produtos dos satélites Landsat-5 e concentrando-se na banda do infravermelho próximo (NIR), , mais utilizada em análises hidrológicas devido à sensibilidade à umidade e cobertura vegetal.

Os critérios de escolha incluem a ausência significativa de nuvens, para maior qualidade visual e precisão nas interpretações. As datas das imagens foram escolhidas a partir de indícios de inundação da superfície da várzea (cheia), somando um total de quatro datas de imagens para esta análise. Essa abordagem permitiu capturar variações sazonais e comportamentos dinâmicos do corpo hídrico. As imagens que correspondem a momentos de grandes cheias em anos distintos do ciclo analisado, as cenas representam momentos de comportamento da superfície da várzea nos momentos de ápice das cheias (Tabela 1).

Tabela 1: Relação das imagens de satélite e suas características

Data	Satélite	Sensor
11 de fevereiro de 2005	Landsat-5	MSS/TM
05 de março de 2007	Landsat-5	MSS/TM
24 de janeiro de 2010	Landsat-5	MSS/TM
16 de março de 2011	Landsat-5	MSS/TM

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

Tratamento dos dados hidrológicos

Os dados de cota e vazão fluviométrica obtidos na estação PSJ são disponibilizados em formato de tabela (.csv). No software Excel®, os dados foram organizados para a produção de análises e gráficos com o comportamento do regime no trecho estudado do rio Paraná (Figura 1). Primeiramente foram ajustadas as series diárias dos diferentes anos analisados, e posteriormente gerado as estatísticas descritivas (médias mensais, máximos e mínimos). Por fim, foram elaborados gráficos de hidrograma, facilitando a visualização de padrões sazonais das cheias e correlação entre cota e vazão, o que possibilitou observar possíveis alterações na curva-chave que serviram de subsídio na seleção de imagens de satélite representativas de diferentes regimes hidrológicos.

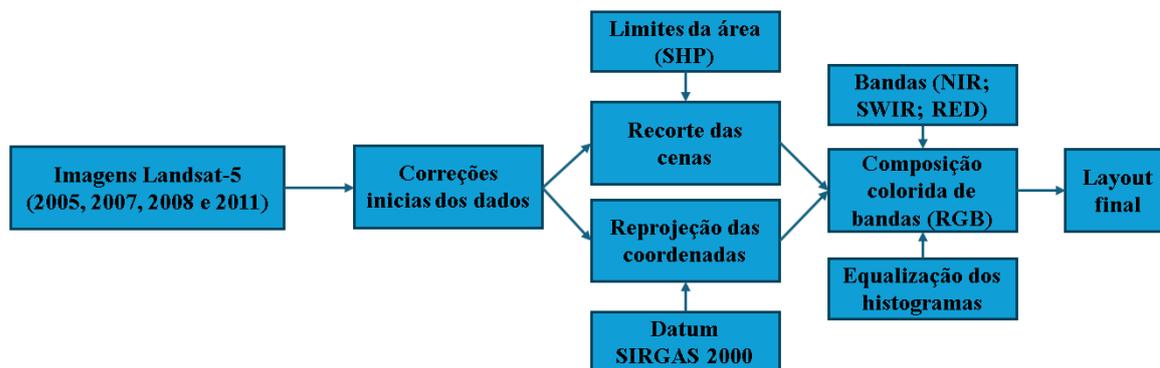
Neste sentido, foram produzidos gráficos de eixo X (datas) e Y (vazão e cota) diários de cada ano, gráficos de vazões e cotas mínimas, médias e máximas mensais, curva-chave de cada ano e datas de ocorrência dos picos máximos. Este conjunto de variáveis e estatísticas do comportamento do rio Paraná são essenciais para a observação dos efeitos da subida do nível da água nas superfícies posicionadas em diferentes altimetrias na planície de inundação. Os dias em que cada imagem de satélite foi registrada foram apontados nos gráficos, a fim de facilitar o entendimento do contexto hidrológico naquele momento.

Tratamento das imagens de satélite

O uso das imagens de satélites aliado às técnicas de processamento digital de imagens (PDI) permitiram a identificação e extração de manchas de encharcamento/saturação e inundação das superfícies da várzea. As imagens de satélite das datas trabalhadas foram importadas para o software livre QGIS 3.34, sendo que, todas as etapas do pré-processamento e processamento destes dados foram executadas neste SIG. O pré-processamento é uma etapa importante para ajustar as informações dos dados digitais devido ser projetado para melhorar a clareza e qualidade das imagens de satélite, consistindo nas correções iniciais dos dados brutos com o objetivo de facilitar a extração de informações específicas (Figura 2).

Nessa etapa, são realizados ajustes relacionados ao recorte das cenas de cada data utilizada. A etapa de recorte é feita pela ferramenta ‘recortar raster pela camada máscara’, sendo que esta camada consiste em um arquivo vetorial (.shp) representando os limites da área estudada. O recorte foi aplicado nas bandas 5, 4 e 3 do Landsat-5, em que os números correspondem respectivamente aos canais espectrais do infravermelho médio, infravermelho próximo e vermelho visível.

Na etapa seguinte é feita a reprojeção do sistema de coordenadas do datum WGS84 para o SIRGAS 2000 geográfico que representa a projeção mais utilizada em território brasileiro, este passo é realizado em lote na ferramenta ‘projeções de raster – reprojeter coordenadas’. Na sequência, para cada data foi elaborada uma composição RGB colorida representando as cores naturais da superfície terrestre através da ferramenta ‘construir raster virtual’ onde as bandas na faixa do visível foram empilhadas. Por fim, o resultado obtido é apresentado em um layout para compor e organizar os elementos gráficos e cartográficos (Figura 2). Esse procedimento permite a visualização clara e padronizada da imagem, facilitando a análise das repostas da superfície na área estudada.

Figura 2 – Fluxograma de pré-processamento e processamento digital.

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

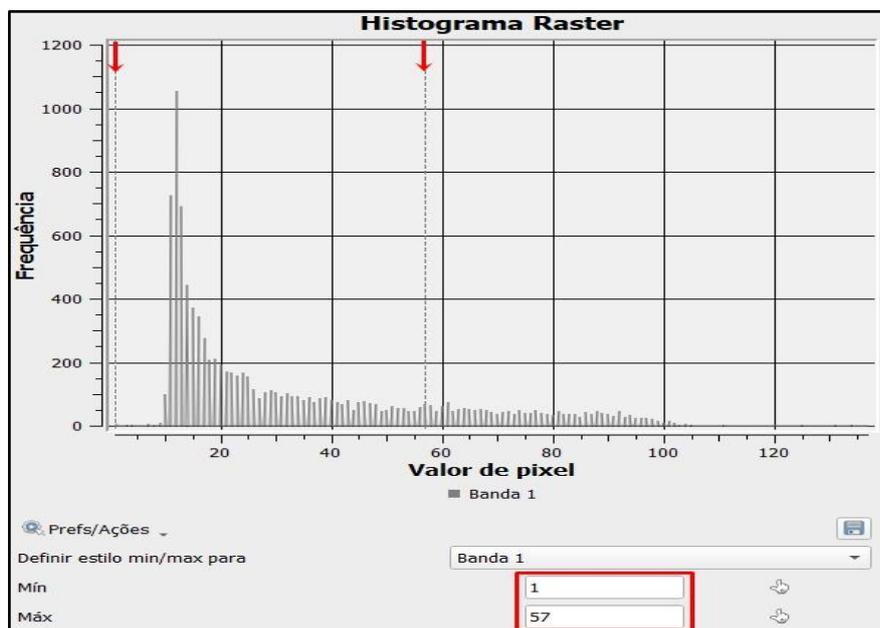
A seguir é descrita a metodologia de obtenção das máscaras de saturação e/ou inundação da superfície, utilizando as respostas espectrais da banda do infravermelho próximo (NIR) das imagens Landsat-5 software QGIS. Neste processamento deve-se analisar visualmente as respostas espectrais dos pixels mais escuros das cenas de cada data, para tanto, é necessário reconhecer que os pixels mais escuros (próximos ao preto) possuem respostas mais baixas nos níveis de cinza também conhecidos como números digitais (*digital numbers*). A banda NIR é muito adequada para esta análise, pois a água absorve fortemente a radiação no canal do infravermelho, o que significa que áreas alagadas ou saturadas refletem muito pouco nessa faixa do espectro (MONDEJAR; TONGCO, 2019).

A primeira etapa para obtenção das máscaras de saturação/inundação é realizada nas propriedades da banda NIR de cada data. O histograma mostra a distribuição da frequência dos valores de pixel de determinada banda, inferindo a necessidade de manipular manualmente este gráfico conforme a percepção do usuário (Figura 3). O intervalo a ser definido deve representar um realce de contraste visual na exibição da imagem. Assim, para cada data foi definido um intervalo de valor de pixel que representasse somente as áreas indicando a presença de água, ou seja, com baixa resposta espectral (pixels de cinza-claro, cinza-escuro até o preto). O passo seguinte é a reprojeção do SRC da banda NIR das coordenadas geográficas (SIRGAS 2000) para métricas em um plano (SIRGAS 2000 UTM 22S), utilizando novamente a ferramenta ‘projeções de raster – reprojeter coordenadas’.

A próxima etapa é a criação da máscara binária (0 a 1) onde os pixels escuros (de baixa refletância no NIR), indicativos de saturação ou encharcamento do solo, sejam destacados com

valor 1. Este processo é realizado na ferramenta ‘calculadora raster’ do SIG utilizado, onde é definida uma expressão simples indicando a banda NIR e a faixa de valor que se deseja criar a máscara, por exemplo, (Banda_NIR < 50) e indicar um local para salvar o resultado. A seguinte etapa é referente à transformação dos dados matriciais para vetoriais em que essa conversão dos pixels é feita na ferramenta ‘pixels de raster para polígono’. O arquivo vetorial gerado na etapa anterior apresenta milhares de polígonos individualizados que representam cada um dos pixels associados às manchas de saturação/inundação. Assim, é preciso gerar um arquivo vetorial único que represente todo este conjunto. Para tanto, foi utilizada a ferramenta de geometria do vetor ‘dissolver’, como o próprio nome indica, esta ferramenta dissolve os vetores para um único arquivo. Por fim, foram identificados os atributos gerais destes arquivos com o objetivo de encontrar a área que eles ocupam em m², posteriormente convertido em km².

Figura 3 – Exemplo de manipulação do histograma da banda NIR.



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação entre as máscaras e os dados de cota e vazão da estação de Porto São José indicou coerência entre o comportamento espectral observado nas imagens e os eventos

hidrológicos registrados, reforçando a confiabilidade da metodologia. Para garantir a coerência entre os dados hidrológicos e a resposta espectral registrada nas imagens, cada cena de satélite foi analisada em relação à curva diária de vazão. As imagens selecionadas correspondem a diferentes momentos do ciclo hidrológico, com destaque para aquelas captadas no auge do pico de cheias intensas. Essa relação temporal foi verificada por meio de hidrogramas, nos quais as datas das imagens foram comparadas com os pontos das cheias anuais. Dessa forma, buscou-se assegurar que as máscaras geradas refletissem de fato os estágios ativos do pulso de inundação.

Análise do comportamento do regime hidrológico

As hidrógrafas de vazão diária apresentadas para os diferentes anos estudados revelam importantes padrões sazonais do regime hidrológico da planície de inundação do alto rio Paraná. O traço vermelho nos gráficos indica a data em que cada imagem foi obtida no respectivo ano, servindo como referência para compreensão do contexto hidrológico do momento de tomada da cena orbital. Em todos os anos analisados, observa-se a manifestação do pulso de inundação característico dos grandes rios tropicais, com ascensão das vazões nos meses de verão (dezembro a março) e declínio progressivo ao longo da estação seca (maio a setembro). As maiores vazões ocorrem predominantemente entre os meses de janeiro e março, período chuvoso em que os picos hidrológicos são mais frequentes.

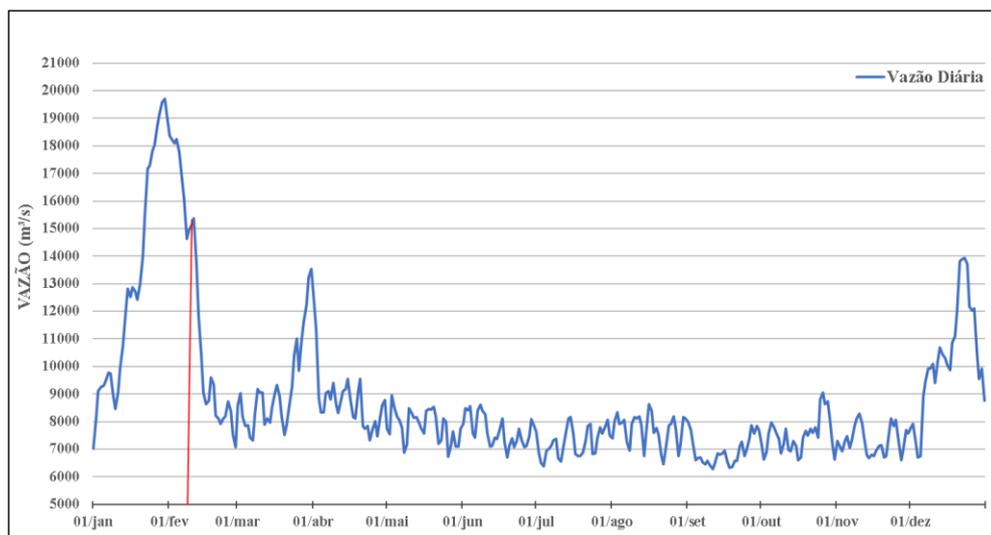
As hidrógrafas dos anos de 2005, 2010 e 2011 mostram picos abruptos e intensos associados a eventos de chuva concentrada. Já em 2007, a curva demonstra aumentos graduais e mais prolongados, sugerindo um pulso de cheia mais dilatado. Essa variação entre os anos com pulsos rápidos e outros com cheias mais longas reflete a variabilidade climática interanual indicando estar relacionada à atuação de fenômenos como El Niño e La Niña. Outro aspecto relevante é a extensão do período de vazante (recessão das águas), que se inicia geralmente em abril e se estende até setembro ou outubro, marcando a fase de retração do alagamento na planície. Esse período é caracterizado por declínio gradual das vazões, em alguns anos com patamares mínimos bem acentuados (ex.: 2010), evidenciando períodos de seca.

Essa dinâmica sazonal é importante para compreender a correspondência entre os registros hidrométricos e as evidências espaciais observadas nas imagens de satélite. Nos anos em que os picos de vazão ocorrem de forma abrupta, a resposta da planície tende a ser rápida, com amplas áreas de inundação visíveis imediatamente após o ápice do evento. Em

contrapartida, quando as cheias se desenvolvem de modo mais gradual, a expansão da lâmina d'água ocorre de forma progressiva e persistente, permitindo maior estabilização dos espelhos d'água e maior permanência das zonas encharcadas. Assim, a análise combinada entre o comportamento hidrológico e as imagens orbitais possibilita interpretar com maior precisão a extensão e duração das inundações ao longo do ciclo anual e interanual.

Na figura 4 observa-se um pico expressivo de vazão no início de fevereiro, com valores próximos a 20.000 m³/s, seguido por uma queda acentuada. O traço vermelho indica a data de 11 de fevereiro, mostrando que a imagem foi registrada logo após o ápice da cheia, o que é relevante para interpretar os padrões de inundação detectados por sensoriamento remoto. Ao longo do ano predominam valores entre 6.000 e 10.000 m³/s (regime ordinário). Embora a imagem não coincida exatamente com o pico máximo da vazão, isso não implica necessariamente uma redução na área inundada. Em grandes sistemas fluviais, a extensão da inundação pode permanecer elevada por vários dias ou semanas após o pico hidrológico, devido à defasagem entre a curva de vazão (STEVAUX & LATRUBESSE, 2017).

Figura 4 – Série de vazões diárias em 2005 na estação fluviométrica Porto São José

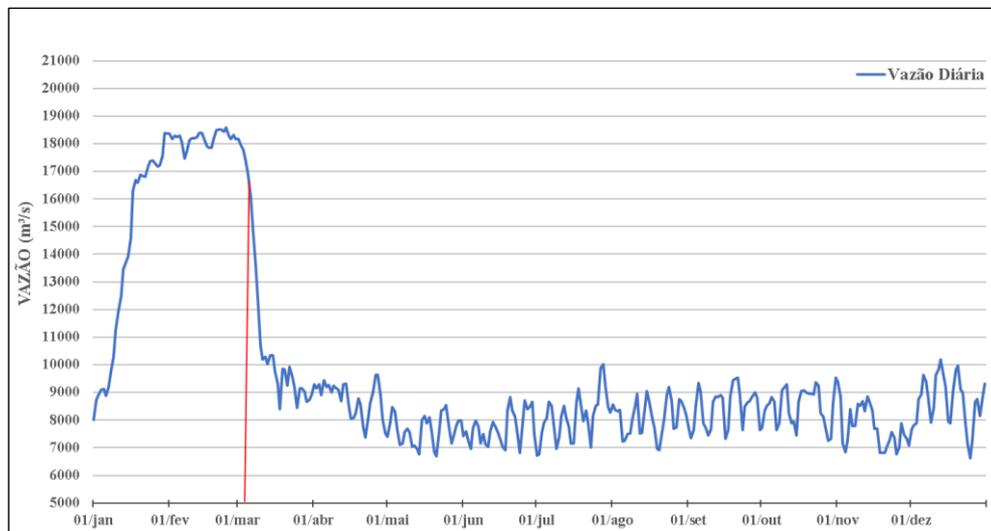


Fonte: ANA (2025). Elaborado pelos autores (2025).

A figura 5 mostra a série de vazões diárias em 2007 na estação Porto São José, com destaque para um pulso de cheia significativo em janeiro e fevereiro. A linha vermelha

posicionada no início da curva de descida do evento de cheia intenso e prolongado marca a data da imagem de satélite.

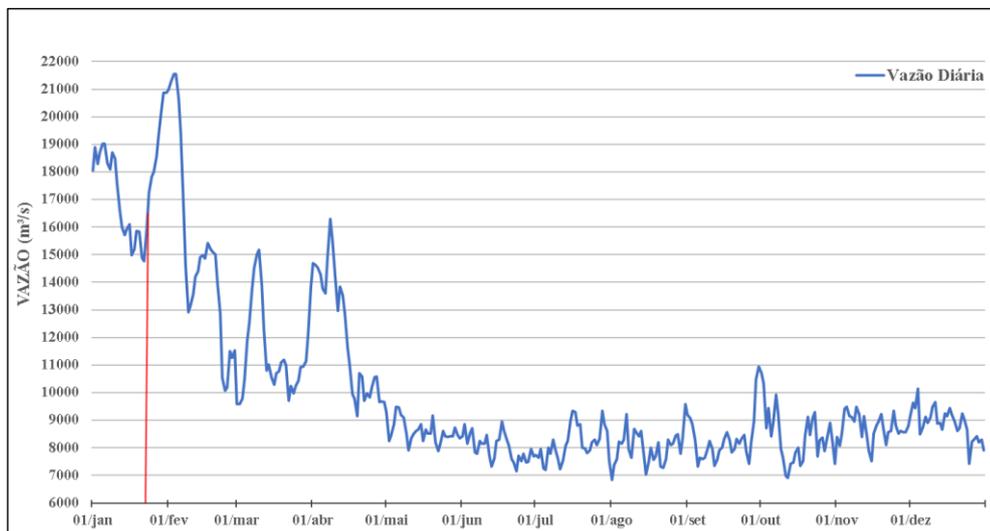
Figura 5 – Série de vazões diárias em 2007 na estação fluviométrica Porto São José



Fonte: ANA (2025). Elaborado pelos autores (2025).

A figura 6 apresenta a série de vazões diárias do ano de 2010, destacando um pulso expressivo de cheia que ultrapassou 20.000 m³/s no início do ano. Esse evento caracteriza-se por uma elevação abrupta das vazões, evidenciada pela acentuada inclinação ascendente da curva hidrológica, seguida de uma redução relativamente rápida após o pico principal. A linha vermelha indica o momento de ocorrência da imagem de satélite, permitindo correlacionar o comportamento hidrológico com os padrões de inundação

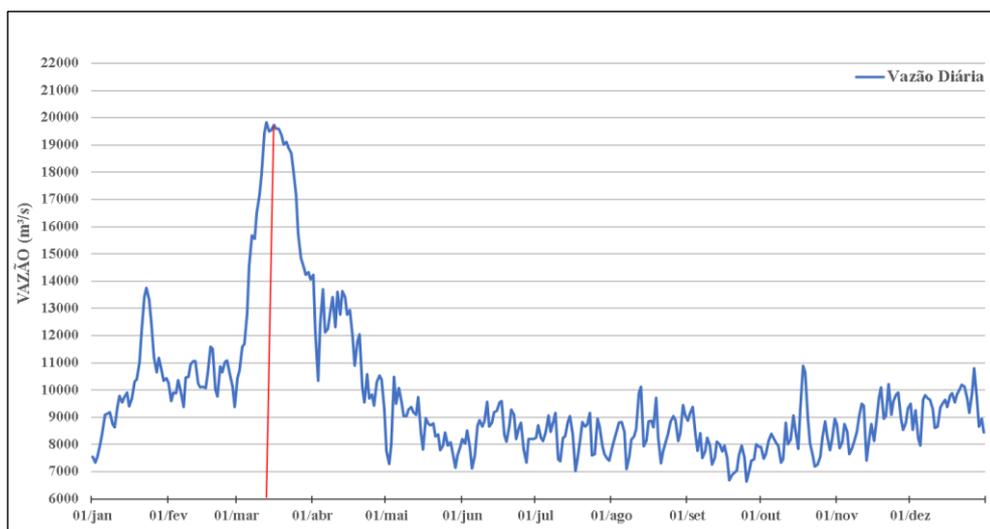
Figura 6 – Série de vazões diárias em 2010 na estação fluviométrica Porto São José



Fonte: ANA (2025). Elaborado pelos autores (2025).

A figura 7 representa as vazões de 2011, e exibe um pulso de cheia acentuado com pico de vazão próximo a 20.000 m³/s no início de março. A linha vermelha posiciona-se próxima ao ápice dessa cheia, indicando o momento da imagem utilizada para análise espectral.

Figura 7 – Série de vazões diárias em 2011 na estação fluviométrica Porto São José



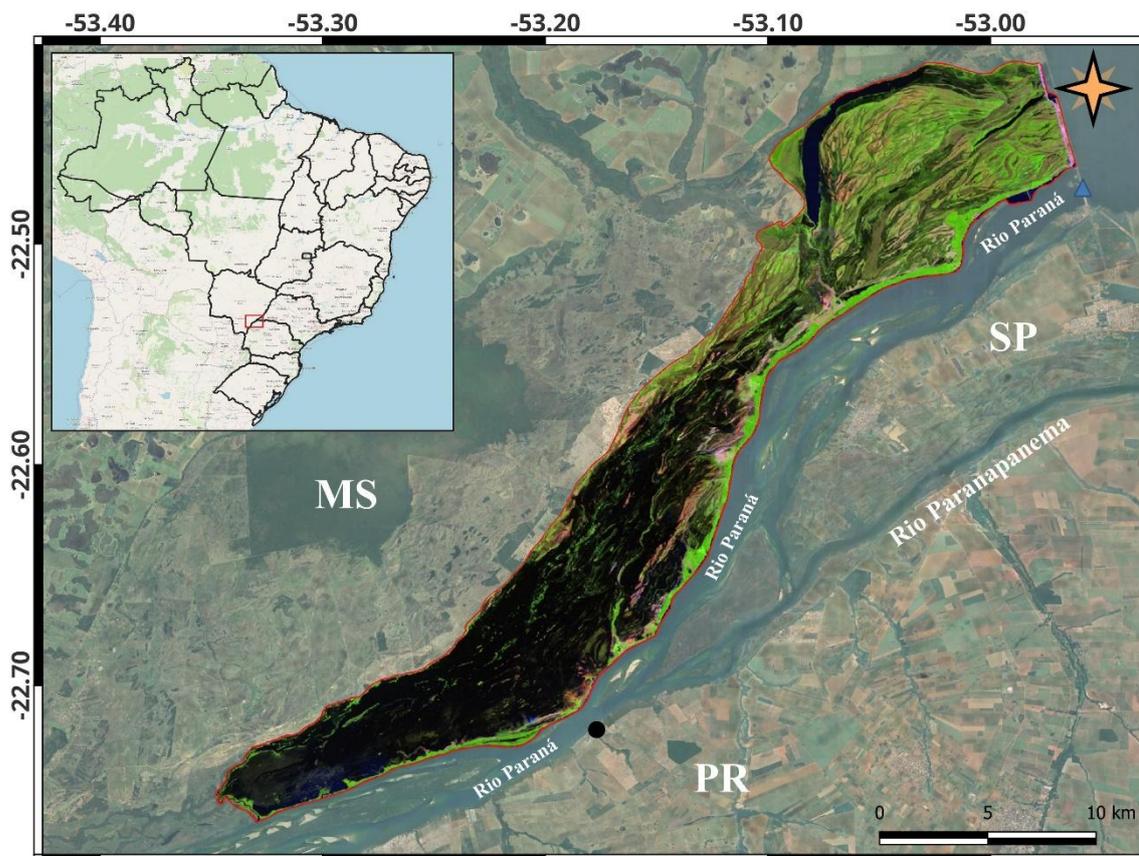
Fonte: ANA (2025). Elaborado pelos autores (2025).

Imagens de satélite da planície de inundação do alto rio Paraná

A imagem de satélite de 11 de fevereiro de 2005 foi registrada com a vazão em PSJ marcando $15.350 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figura 8). Essa condição indica que a imagem corresponde ao momento de regressão do pulso de cheia. As manchas escuras distribuídas amplamente no interior da área destacam zonas com presença de água acumulada e saturação/encharcamento do solo. A tonalidade mais escura das águas sugere profundidade variável e possível concentração de matéria orgânica ou vegetação submersa. Essas manchas se concentram majoritariamente na porção sul/sudoeste da área estudada.

Esse padrão indica que, mesmo após o pico do pulso de inundação ter passado, a umidade permanece retida em extensas áreas da planície, resultado da baixa declividade, da elevada capacidade de armazenamento superficial. Essa persistência de saturação evidencia o papel da planície como reservatório natural, mantendo condições úmidas prolongadas que favorecem a permanência de corpos d'água rasos, brejos e áreas encharcadas.

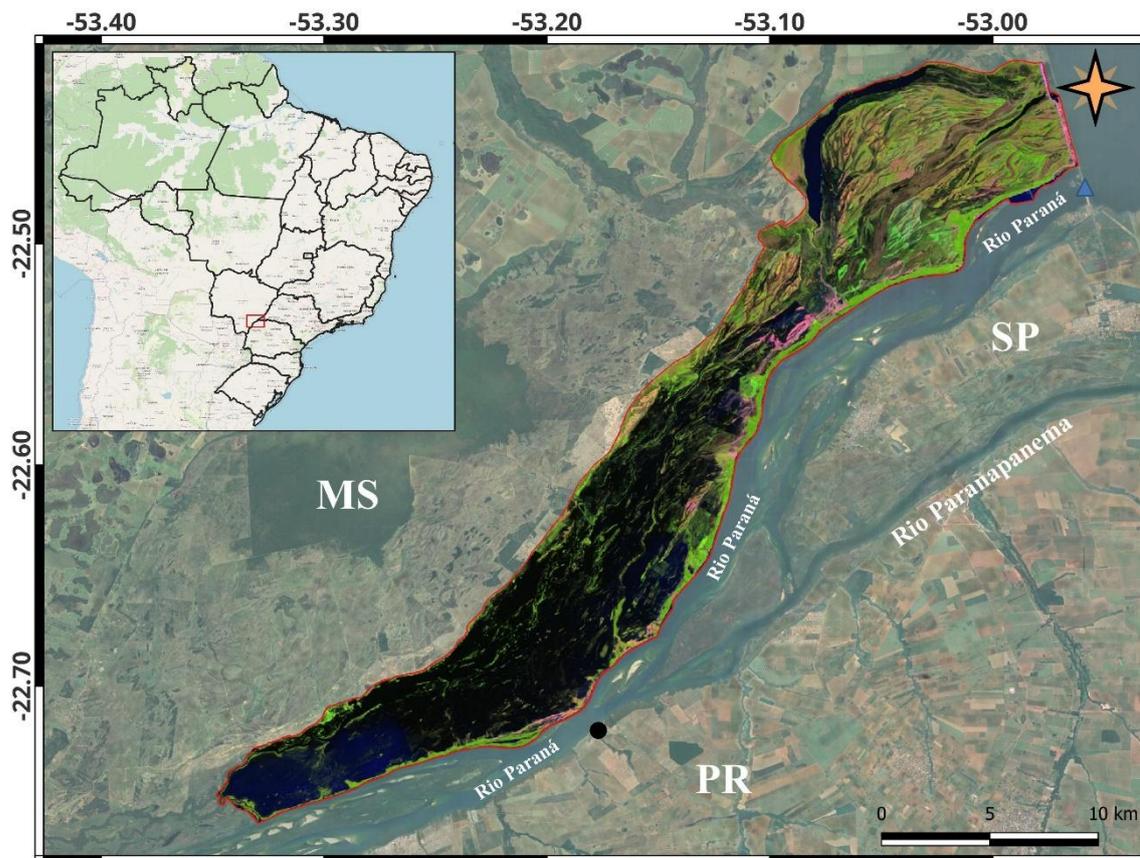
Figura 8 – Imagem geoespacial da planície de inundação (11 de fevereiro 2005).



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A imagem de satélite de 5 de março de 2007 foi registrada com a vazão em PSJ marcando 16.876 m³/s (Figura 9). É observado um aumento do nível d'água em relação à imagem anterior que se evidencia pela maior presença de água em superfície no setor extremo sul/sudoeste da área de estudo (manchas em azul). Tal condição indica o transbordamento do canal secundário rio Baía. Além disso, há indícios de que ocorram extravasamentos localizados nos diques naturais do rio Paraná, os quais atuam como barreiras morfológicas entre o canal e planície, que em ocasião de transbordamento, ocorre o avanço das águas para setores mais internos da planície.

Em imagens de satélite em cor natural, as áreas alagadas geralmente apresentam tons azulados, cuja intensidade pode variar conforme a profundidade ou presença de sedimentos da água ou vegetação submersa. Na imagem, pode-se observar que áreas saturadas (tonalidade azulada) no trecho inferior indicam a presença de lâmina d'água em superfícies recém-inundadas, características típicas de áreas de transbordamento. Canais secundários e lagoas marginais, que anteriormente estavam isolados ou com menor volume de água, agora aparecem interligados ao canal principal, formando um mosaico hídrico mais extenso.

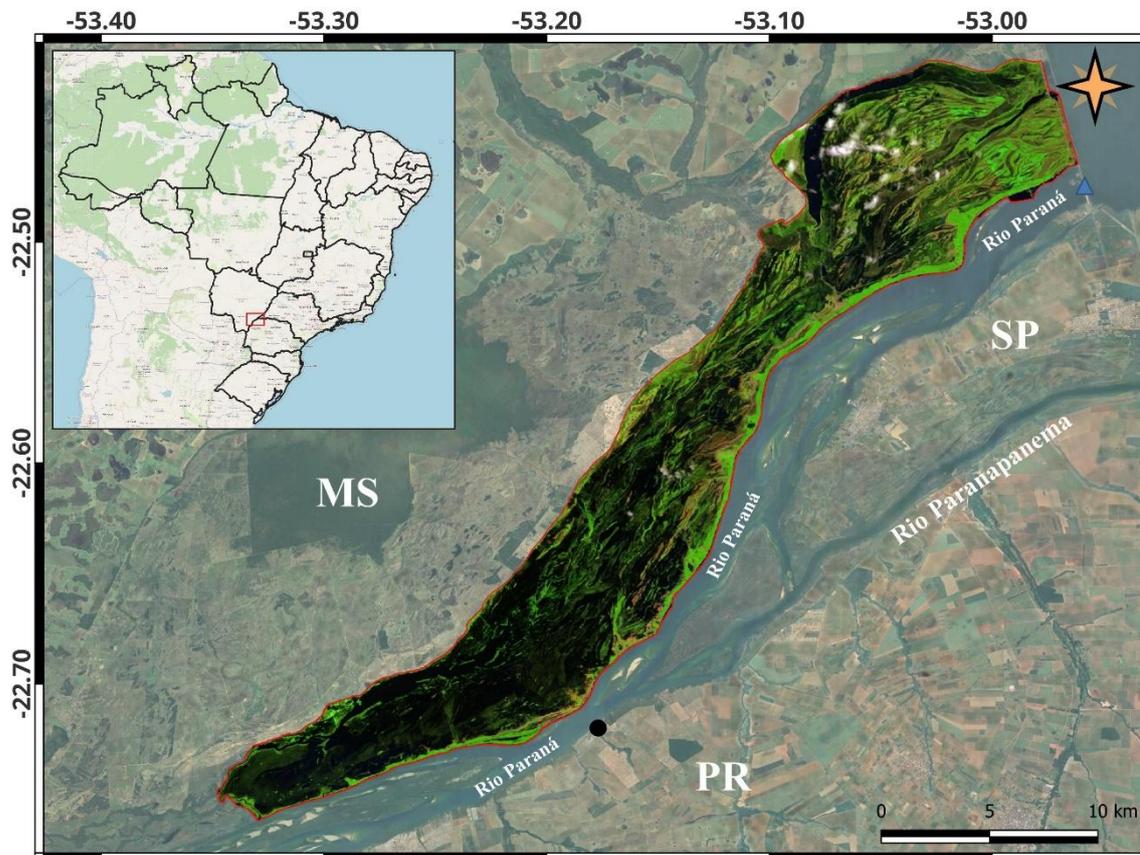
Figura 9 – Imagem geoespacial da planície de inundação (5 de março 2007).

Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A imagem de satélite de 24 de janeiro de 2010 foi registrada com a vazão de 17.249 m³/s em PSJ (Figura 10), mostrando o momento inicial de um grande repique da fase de cheia, com manchas escuras bem marcadas sobre as áreas anteriormente secas ou semiúmidas. A expansão das áreas com presença de umidade e o preenchimento de interflúvios evidenciam a elevação do lençol freático e a conexão hidrológica lateral entre os ambientes de diferentes topografias.

A inundação com presença de lamina d'água no extremo sul/sudoeste ocorre novamente mostrando as lagoas marginais e canais abandonados, que anteriormente eram parcialmente isolados, agora se integram completamente ao sistema de fluxo principal. Isso é evidenciado pela uniformidade das cores e ausência de manchas descontínuas, bem como de áreas secas no interior da planície. Nestes resultados é importante destacar a forma como ocorre a progressão da inundação ao atingir níveis de vazão extremos.

Figura 10 – Imagem geoespacial da planície de inundação (24 de janeiro 2010).



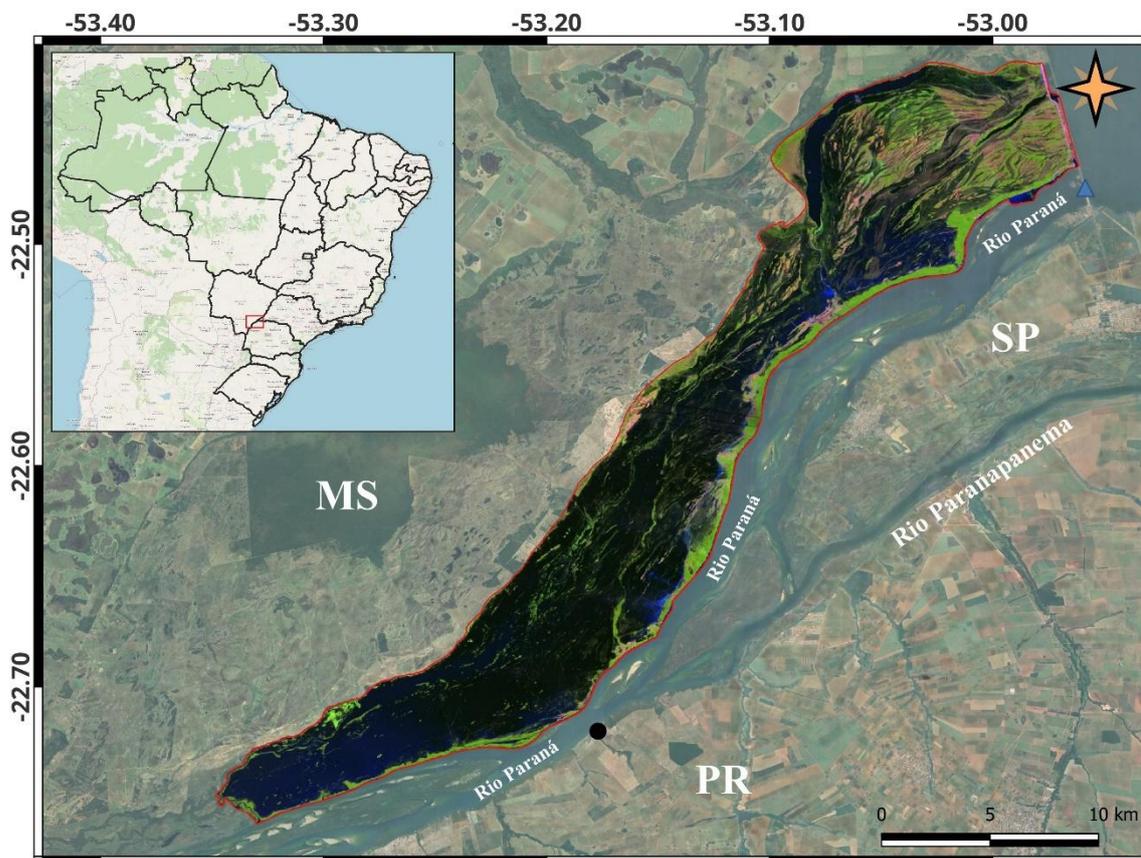
Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

A imagem de satélite de 16 de março de 2011 foi registrada com a vazão de 19.746 m³/s em PSJ (Figura 11), mostrando a maior vazão registrada entre os anos estudados, destacando um processo intenso de cheia generalizado na mesma região das últimas datas apresentadas. O setor sudoeste/sul do polígono apresenta a maior faixa lateral de alagamento entre todas as imagens, com águas invadindo extensivamente a planície, inclusive evidenciando reversão da drenagem e avanço de alagamentos pontuais por refluxo hidrodinâmico. Essa expansão pode ser vista pelas grandes áreas azuladas que antes apareciam como área semiúmida.

A homogeneidade das cores sugere que mesmo áreas de banhados e solos previamente saturados agora encontram-se totalmente submersas, contrastadas pelos reflexos de luz característicos da lâmina d'água contínua. Em uma grande cheia deste porte ocorre grande

conectividade hidrológica entre todos os elementos fluviais: rio principal, canais secundários, lagoas marginais, meandros abandonados e áreas de diques naturais.

Figura 11 – Imagem geoespacial da planície de inundação (16 de março 2011).



Fonte: Elaborado pelos autores (2025).

De forma geral, os resultados demonstram a elevada capacidade dos produtos de sensoriamento remoto em registrar, com precisão espacial e temporal, as variações associadas aos processos de saturação e inundação do solo na planície do alto rio Paraná. As imagens analisadas evidenciam respostas espectrais claras, permitindo identificar desde a expansão inicial da lâmina d'água até a permanência da umidade residual.

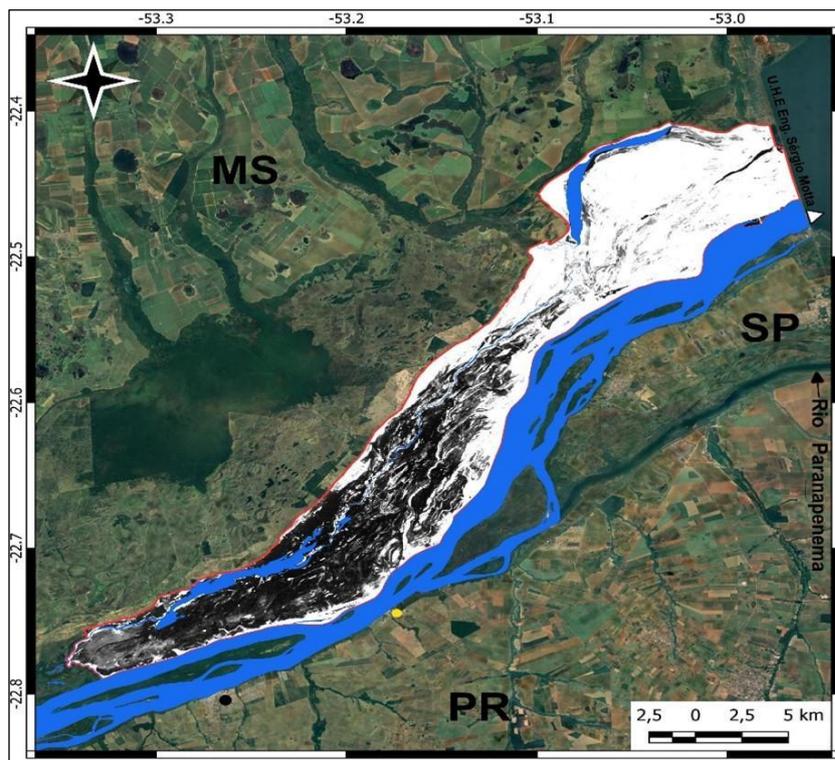
Máscaras de inundação detectadas no sensoriamento remoto

Os resultados obtidos contemplam um conjunto abrangente de análises espaciais referentes às máscaras binárias de saturação e/ou inundação do solo. Considerando a área total da planície de inundação analisada, que abrange aproximadamente 308 km², observou-se uma

variação significativa entre 182,7 km² e 248,8 km² nas extensões alagadas ao longo das datas avaliadas. Essa oscilação reflete distintos estágios do pulso de cheia na planície do alto rio Paraná, incluindo momentos de início da inundação, máxima expansão da lâmina d'água e fase de recessão. A amplitude espacial detectada demonstra a sensibilidade do método na identificação de áreas úmidas e evidencia a dinâmica sazonal.

De modo geral, os dados apresentados revelam padrões consistentes de variação espacial das áreas alagadas ao longo das diferentes imagens analisadas, refletindo a resposta direta da planície às oscilações do regime hidrológico. Observa-se que as zonas de maior recorrência de inundação coincidem com os setores de menor cota altimétrica e com áreas de maior conectividade entre o canal principal e canais secundários. As diferenças na extensão e na distribuição das manchas binárias indicam não apenas a influência do volume de água armazenado, mas também o papel da morfologia da planície na direção e permanência do fluxo superficial. Assim, a análise espacial integrada evidencia uma forte relação/dependência entre relevo, hidrodinâmica e padrões temporais de inundação, confirmando a eficácia do método na caracterização das superfícies saturadas/encharcadas e inundadas.

A figura 12 que corresponde à data de 11 de fevereiro de 2005, revela uma extensa área alagada na planície do alto rio Paraná, com uma máscara de inundação totalizando 190,4 km². As manchas extraídas concentram-se principalmente na porção sudoeste e central da planície, refletindo a atuação de processos hidrológicos intensos associados à cheia daquele período. A distribuição espacial das manchas de saturação e inundação evidenciadas na imagem binária apresenta um padrão geomorfológico fortemente controlado pela estrutura altimétrica da planície. A distribuição das manchas sugere ainda que o evento registrado neste período imediatamente após o pico de cheia, promoveu a expansão lateral das águas e atingiu setores mais internos da planície devido à grande influência da morfologia relictual da drenagem.

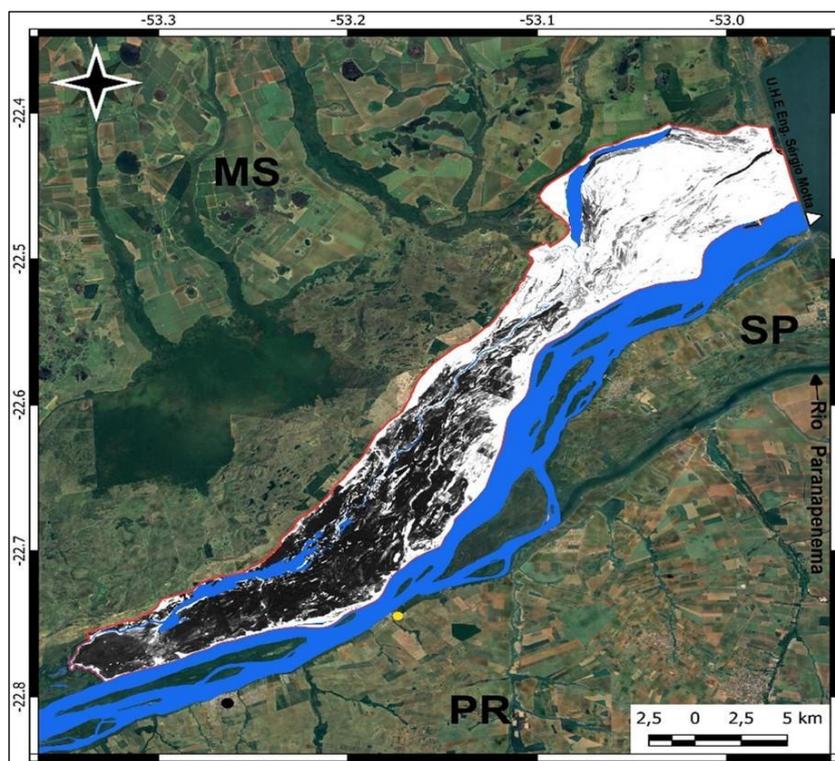
Figura 12 – Máscara binária de saturação ou inundação do solo na planície (2005).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A figura 13 apresenta a máscara binária da data de 2007 revelando uma área total de resposta hidrossaturada de aproximadamente 212,5 km², evidenciando uma expansão significativa em relação à cena de fevereiro de 2005. Observa-se um padrão espacial semelhante à data anterior, onde áreas de saturação se conectam formando um mosaico denso. Na porção noroeste, nota-se uma sutil intensificação da resposta espectral associada à saturação, indicando possível avanço da lâmina d'água em direção às áreas mais elevadas da planície, possivelmente como reflexo da persistência de níveis elevados de vazão.

A configuração observada na cena de 2007 também reflete a elevada conectividade hidrossedimentar típica dos períodos de cheia prolongada em que ocorre o acúmulo de água nas depressões internas gerando uma resposta espectral mais ampla e homogênea. Esse comportamento evidencia a capacidade de retenção hídrica da planície e reforça a influência do relevo suave e dos gradientes reduzidos na manutenção do alagamento. Assim, a cena de 2007 demonstra um estágio de estabilização hídrica mais acentuado e marcado por trocas lentas entre os fluxos superficiais e subsuperficiais.

Figura 13 – Máscara binária de saturação ou inundação do solo na planície (2007).



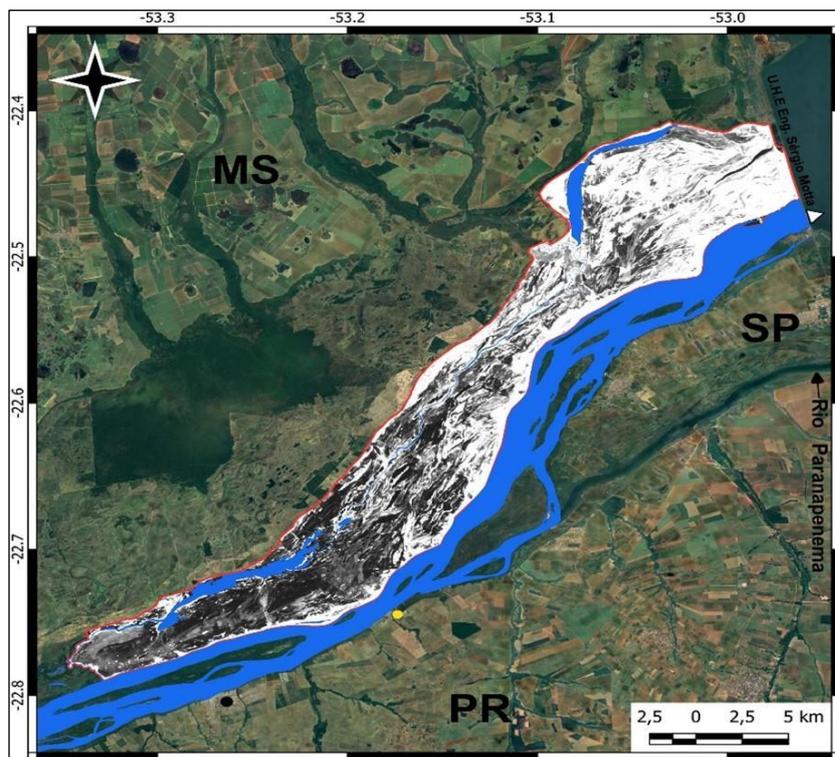
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A figura 14 máscara binária obtida para a data de 2010 revela uma área total de 214,1 km² associada à presença de água superficial ou solo saturado, evidenciando uma fase avançada de cheia no setor analisado da planície de inundação do alto rio Paraná. A distribuição espacial das manchas pretas (classificadas como áreas hidrossaturadas ou alagadas) apresenta alta densidade, continuidade e coalescência, especialmente nas porções mais rebaixadas da planície, que atuam como zonas preferenciais de armazenamento de água.

Esse padrão de alagamento revela uma cheia bem desenvolvida, com forte conectividade hidrológica lateral entre o canal principal, canais abandonados e depressões internas da planície. Nota-se que as feições mapeadas formam estruturas lineares e ramificadas como resposta hidrológica lateral, típica de eventos de cheia com duração prolongada que reflete a importância da morfologia e topografia de baixa declividade na modulação do padrão

de inundação da planície. A comparação entre as três datas analisadas revela diferenças significativas tanto na extensão espacial das áreas mapeadas como alagadas quanto no grau de conectividade hidrológica entre os compartimentos da planície.

Figura 14 – Máscara binária de saturação ou inundação do solo na planície (2010).



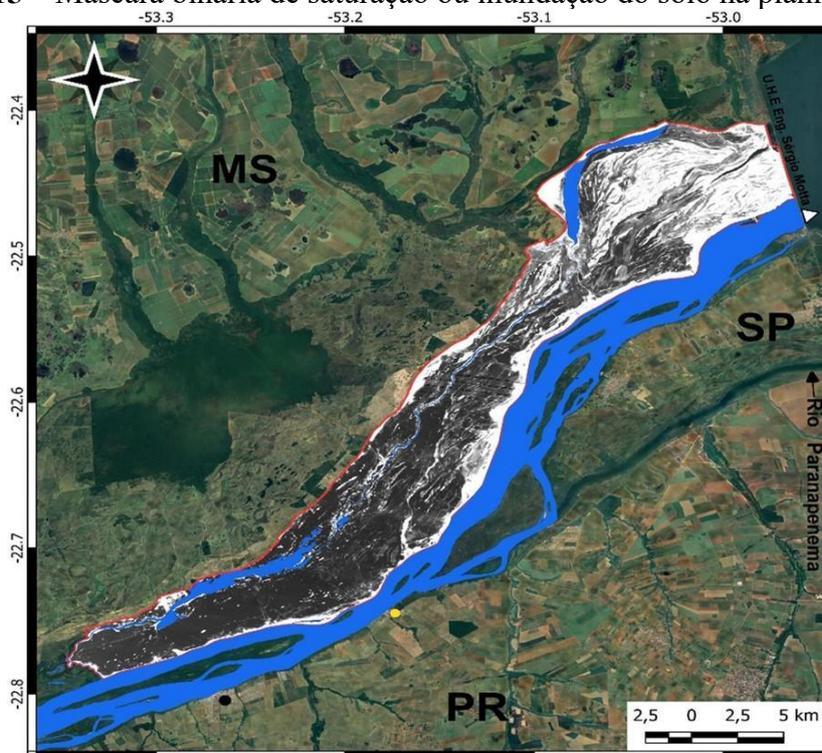
Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Na figura 15 correspondente à data de 2011 e com área de 248,8 km². Destaca-se a presença de manchas densas que atingem as feições morfológicas herdadas da antiga dinâmica fluvial, evidenciando a importância da estrutura geomorfológica no direcionamento do escoamento e acúmulo de água. A distribuição uniforme das manchas, com poucos vazios entre áreas alagadas, indica um evento de cheia com elevado grau de expansão e estabilidade hídrica, compatível com o pico máximo do pulso de cheia. A extensão espacial das manchas e seu padrão coalescente reforçam a eficácia da técnica de limiarização da banda NIR para detecção de encharcamento em paisagens úmidas.

Além disso, a presença de manchas de saturação também é observada em setores periféricos da planície, o que reforça o papel da conectividade hidrológica difusa, mesmo em

áreas não diretamente ligadas ao leito principal. O contorno da máscara demonstra que o evento hidrológico de 2011 permitiu o alagamento de áreas mal drenadas em praticamente toda a extensão da planície mapeada, com pouca fragmentação e elevada continuidade espacial, o que configura uma cheia altamente integradora. Esse padrão reforça a importância da sazonalidade hidrológica e da topografia plana na redistribuição da lâmina d'água em planícies de grande porte como a do alto rio Paraná.

Figura 15 – Máscara binária de saturação ou inundação do solo na planície (2011).



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização da banda do infravermelho próximo (NIR) para extração de máscaras binárias de áreas saturadas na planície de inundação mostrou-se eficaz para identificar, de forma objetiva e reproduzível, o padrão espacial das manchas de cheia. A aplicação de limiares espectrais simples às imagens Landsat-5 e Landsat-8 permitiu isolar pixels com baixa reflectância, compatíveis com a presença de lâmina d'água ou solo encharcado, inicialmente

concentradas em antigos canais fluviais, áreas mal drenadas e zonas marginais, mas que, durante os pulsos de cheia mais intensos, expandem-se lateralmente por extensas áreas da planície, ultrapassando os limites das feições morfológicas previamente saturadas. A comparação com séries hidrológicas revelou forte correlação entre os períodos de cheia e a expansão das manchas detectadas, especialmente em anos de maior vazão, como 2010 e 2011. Essa abordagem sobre a reflexão da resposta superficial ao pulso de inundação, serve como subsídio a ações e políticas de planejamento territorial, zoneamento ambiental e manejo de áreas úmidas. Portanto, os resultados obtidos não apenas reforçam o potencial da técnica para o monitoramento contínuo da planície, como também oferecem suporte para políticas públicas voltadas à gestão de riscos e conservação de ambientes fluviais.

REFERÊNCIAS

ALLEN, Y. Landscape scale assessment of floodplain inundation frequency using Landsat imagery. *River Research and Applications*, v. 32, n. 7, p. 1609-1620, 2016.

ALBERTINI, C. et al. Detection of surface water and floods with multispectral satellites. *Remote Sensing*, v. 14, n. 23, p. 6005, 2022.

BATES, P. D. et al. Integrating remote sensing observations of flood hydrology and hydraulic modelling. *Hydrological processes*, v. 11, n. 14, p. 1777-1795, 1997.

LELI, I. T.; STEVAUX, J. C. The polygenetic floodplain of the Upper Paraná River. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 119, p. 103985, 2022.

MEURER, M. Análise dos regimes de cheias dos rios Paraná e Ivinhema na região de Porto Rico, PR. *Geografia*, v. 28, n. 2, p. 185-195, 2004.

MEURER, M.; MARTINS, D. P.; SOUZA FILHO, E. E. de. Dinâmica das vazões reguladas pelas usinas de Porto Primavera e Rosana, na região do Pontal do Paranapanema, no período 1999-2003. *Geosul*, v. 20, n. 40, p. 147-166, 2005.

MONDEJAR, J. P.; TONGCO, A. F. Near infrared band of Landsat 8 as water index: a case study around Cordova and Lapu-Lapu City, Cebu, Philippines. *Sustainable Environment Research*, v. 29, p. 1-15, 2019.

OVERTON, Ian C. Modelling floodplain inundation on a regulated river: integrating GIS, remote sensing and hydrological models. *River research and applications*, v. 21, n. 9, p. 991-1001, 2005.

ROCHA, P. C. Dinâmica dos Canais no Sistema Rio-Planície Fluvial do Alto Rio Paraná, nas proximidades de Porto Rico – PR, Maringá, 2002, 169 p. Tese (Doutorado em Ecologia de Ambientes Aquáticos Continentais) – Núcleo de Pesquisas em Limnologia, Ictiologia e Aqüicultura, Universidade Estadual de Maringá, 2002.

SILVA, M. A. O.; LIPORACE, F. S. Detecção automática de nuvem e sombra de nuvem em imagens de sensoriamento remoto. *Boletim de Ciências Geodésicas*, v. 22, n. 2, p. 369-388, 2016.

STEVAUX, J. C.; MARTINS, D. P.; MEURER, M. Changes in a large regulated tropical river: The Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil. *Geomorphology*, v. 113, n. 3-4, p. 230-238, 2009.

STEVAUX, J. C.; CORRADINI, F. A.; AQUINO, S. Connectivity processes and riparian vegetation of the upper Paraná River, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 46, p. 113-121, 2013.

STEVAUX, J. C.; LATRUBESSE, E. M. Geomorphology and sedimentology of large river floodplains in tropical and subtropical regions: examples from South America. *Geomorphology*, v. 277, p. 50–75, 2017.

TOWNSEND, P. A.; WALSH, S. J. Modeling floodplain inundation using an integrated GIS with radar and optical remote sensing. *Geomorphology*, v. 21, n. 3-4, p. 295-312, 1998.